所属类别	2020年“华数杯”全国大学生数学建模竞赛	参赛编号

带相变材料的低温防护服御寒效果研究

摘要

本文针对带相变材料的低温防护服的御寒效果进行研究，综合考虑多种传热方式建立热传导模型，并以此模型为基础对低温防护服的防护效果以及一定资金条件下的最佳制作厚度问题进行了研究。

对于问题一，本文首先利用传热学原理对实验者、低温防护服以及外界空气环境组成的系统建立了一维热传导偏微分方程模型，并确定了定解的边值条件，研究了在无风条件下带相变材料的低温防护服对静止的实验者的防护效果。本文利用有限差分方法对微分方程进行转化求解，结果显示：实验者在室外能够坚持的时长为$675s$。

对于问题二，本文在问题一模型的基础上，考虑风速（$3m/s$）对对流换热系数的影响，由经验公式给出了计算对流换热系数时的修正项，并用修正后的模型研究实验者做轻微运动时低温防护服的防护效果。结果显示：实验者在室外能够坚持的时长为$152s$。

对于问题三，本文研究了在多重限制条件（资金、最大承受重量、中间层厚度）下，应该如何增加防护服的厚度，使得实验者在外站立时间尽可能长。本文对此建立了目标优化模型，以实验者的在外站立时长为优化目标，以资金数额和最大承受重量为约束条件，通过编程求解该非线性优化模型的最优解，并得到低温防护服的增厚方案。结果显示：保持内层（织物层）厚度不变，中间层（功能层）的厚度增加至$0.45mm$，最外层（隔热层）的厚度增加至$1.2mm$时御寒效果最优，此时能在外坚持的最长时长为$872.165s$。

对于问题四，本文以问题三中防护服的御寒能力为研究参照，对新复合材料中间功能层的放热能力给出了预期。本文应用二次搜索法寻找两种材料放热能力的比值α，结果显示：如果中间功能层的放热能力比原先提高37.9%，用其制作的低温防护服的御寒能力将不弱于第三问中低温防护服的御寒能力。

关键词：热传导偏微分方程、有限差分法、三次样条插值、二分搜索法

一、 问题重述

1.1 问题背景

由于一些工作需求，人们往往需要在极寒天气下作业，如高山高原工作、潜水员水下工作、现代化工厂的低温车间以及寒冷气候下的野外作业等。为了能使工作顺利进行，科学家团队对低温防护复合材料进行了一系列研究，试图做成防护服用以保护在超低温环境下的工作者。为检验某复合材料的耐低温效果，我们需要对该材料制成的耐低温服装进行实地测试。为了保证实验者的安全，我们先对实验过程进行仿真模拟。

1.2 问题提出

鉴于以上背景，本文需要解决的问题如下：

问题一：假设实验者站在南极洲长城站附近（环境安静，晴天无风，-40℃），我们需要利用传热学原理建立热量传递数学模型，并预测实验者在室外能够坚持的时长。

问题二：假设长城站外面风速为 $3m/s$，实验者做轻微运动。我们需要在第一问模型的基础上进行改进，并计算实验者在室外能够坚持的时长。

问题三：在问题一的室外环境下，实验者静止不动且穿着防护服。假设实验室在低温防护服材料原有支出的基础上能够增加50%以内的资金，我们需要解决在考虑最大承受重量的前提下，如何增加防护服的厚度，使得实验者在外站立时间尽可能的长。

问题四：在问题三中如果不追加资金，我们可以通过提高复合材料中间层的放热能力来提高在户外的活动时间。假定放热能力的提高是在各个温度下同比例增加的，我们需要计算中间功能层的放热能力要比原先提高多少，才能使得实验者在室外坚持的时间不比第三问中坚持的时间少。

二、 问题分析

2.1 问题一的分析：

为了模拟实验者站在南极洲长城站附近时的热量散失过程，我们需要对实验者、带相变材料的低温防护服以及外界空气环境组成的系统建立一维热传导数学模型，并应用此模型预测实验者在室外能够坚持的时长，并以此评估在无风条件下带相变材料的低温防护服对静止实验者的防护效果。

2.2 问题二的分析：

在问题一模型的基础上，我们要对有风和实验者运动的情况进行研究。在计算对流换热系数时，我们需要考虑由风速（$3m/s$）产生的修正项，并用修正后的模型研究实验者做轻微运动时低温防护服的防护效果。

2.3 问题三的分析：

对于问题三，对非线性优化模型进行求解，在多重限制条件（资金、最大承受重量、中间层厚度）下，考虑应该如何增加防护服的厚度，使得实验者在外站立时间尽可能长。我们需要建立目标优化模型，并把实验者的在外站立时长作为优化目标，把资金上限和最大承受重量作为约束条件，通过编程求解该问题的最优解，并由此得到低温防护服的最佳增厚方案。

2.4 问题四的分析：

对于问题四，我们需要把问题三中防护服的御寒能力作为研究参照，求解复合材料中间层的放热能力和在外活动时间的关系。由此推算出中间功能层的放热能力应比原先提高多少，才能使实验者在室外坚持的时间不比第三问中坚持的时间少。

三、模型假设

假设 1：在超低温的环境中，我们不考虑物体对外辐射的热量传递方式

假设 2：耐低温防护服的三层材料之间的间隙可以忽略不计

假设 3：在有热对流现象的气层中空气是均匀流动的

假设 4：材料放热能力的提高是在各个温度下同比例增加的

四、符号说明与名称解释

符号	说明
c	比热容
k	导热系数
ρ	密度
h_c	对流换热系数
d	厚度
x	横坐标
t	时间
T	温度
h	身高
w	体重
r	制作费用

五、模型的建立与求解

5.1 问题一的模型建立与求解

5.1.1 热传导偏微分方程模型[1]

由假设可知，耐低温服装各处的温度与热量交换情况完全一致。因此，我们沿着垂直于皮肤的方向将整个服装系统的热量交换抽象为一维情况，如下图所示：

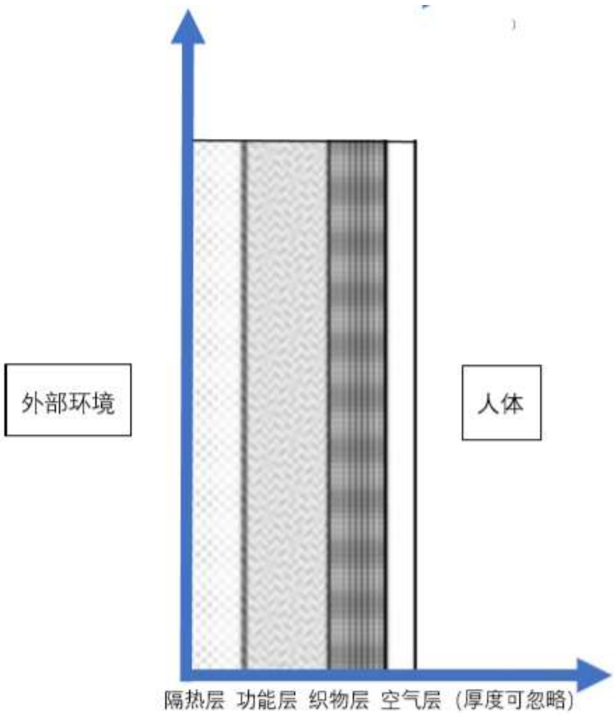

图 1. 防护服热量交换系统示意图

热传导就是如果空间某物体内各点处的温度不同，热量会从温度较高的点处向温度较低的点处流动的现象。我们先来推导一般热传导方程，再根据低温防护服每一层的情况建立相应的热传导方程、边值条件与初值条件。

对于三维情况，用$T(x,y,z,t)$表示物体在位置(x,y,z)处及时刻t的温度。热的传播按傅里叶实验定律进行：物体在无穷小时段dt内流过一个无穷小面积dS的热量dQ与物体温度沿曲面dS法线方向的方向导数$\frac{\partial T}{\partial n}$成正比，即有关系：

$$dQ=-k(x,y,z)\frac{\partial T}{\partial n}dS\,dt$$

其中$k(x,y,z)$为物体在点(x,y,z)处的热传导系数，且有$k(x,y,z)>0$。当物体为均匀且各向同性时，k为常数。n为曲面dS沿热流方向的法线。

为了导出温度T所满足的方程，我们在物体G内任取一闭曲面Γ，它所包围的区域记作Ω，则从时刻t_1到时刻t_2经过曲面Γ流入区域Ω的热量为：

$$Q_1=\int_{t_1}^{t_2}\left[\iint_{\Gamma}k\frac{\partial T}{\partial n}dS\right]dt=\int_{t_1}^{t_2}\left\{\iiint_{\Omega}\left[\frac{\partial}{\partial x}\left(k\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(k\frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(k\frac{\partial T}{\partial z}\right)\right]dV\right\}dt$$

其中$\frac{\partial T}{\partial n}$表示$T$对曲面$\Gamma$的外法向导数。

流入的热量使区域Ω内部的温度发生变化，在时间间隔(t_1,t_2)中物体温度从$T(x,y,z,t_1)$变化到$T(x,y,z,t_2)$所需要的热量为：

$$Q_2=\iiint_{\Omega}c(x,y,z)\rho(x,y,z)[T(x,y,z,t_2)-T(x,y,z,t_1)]\,dV=\int_{t_1}^{t_2}\left(\iiint_{\Omega}c\rho\frac{\partial T}{\partial t}dV\right)dt$$

如果所考察的物体内部没有热源，则由热量守恒，有$Q_2=Q_1$成立，可得：

$$c\rho\frac{\partial T}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left(k\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(k\frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(k\frac{\partial T}{\partial z}\right)$$

如果所考察的物体内部有热源，设热源密度（单位时间内单位体积中所产生的热量）

为$F(x,y,z)$，则在时间间隔(t_1,t_2)中区域Ω内所产生的热量为：

$$Q_3=\int_{t_1}^{t_2}\left(\iiint\limits_{\Omega} c\rho\frac{\partial T}{\partial t}dV\right)dt$$

根据热量守恒定律，有：

$$Q_2=Q_1+Q_3$$

可得：

$$c\rho\frac{\partial T}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left(k\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(k\frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(k\frac{\partial T}{\partial z}\right)+F(x,y,z)$$

由于防寒服接触的介质温度T_1与防寒服表面上的温度T不相同，这样表面处与介质就会产生热交换，根据牛顿实验定律：物体从一介质流到另一介质的热量与两介质间的温度差成正比，即有下式成立：

$$dQ=h(T-T_1)\,dS\,dt$$

因此成立第三类边界条件：

$$-k\frac{\partial T}{\partial n}=h(T-T_1)$$

由以上推导可知，在一维情况下：

防寒服的最外层（隔热层）成立：

$$c_{out}\rho_{out}\frac{\partial T_{out}}{\partial t}=k_{out}\frac{\partial^2 T_{out}}{\partial x^2},x\in(0,0.3)$$

其中c_{out}表示最外层材料的比热容，ρ_{out}表示最外层材料的密度，k_{out}表示最外层材料的导热系数。

防寒服的中间层（功能层）成立：

$$c_{mid}\rho_{mid}\frac{\partial T_{mid}}{\partial t}=k_{mid}\frac{\partial^2 T_{mid}}{\partial x^2}+F,x\in(0.3,0.7)$$

其中c_{mid}表示中间层材料的比热容，ρ_{mid}表示中间层材料的密度，k_{mid}表示中间层材料的导热系数，F表示中间层的热源密度。

防寒服的内层（织物层）成立：

$$c_{in}\rho_{in}\frac{\partial T_{in}}{\partial t}=k_{in}\frac{\partial^2 T_{in}}{\partial x^2},x\in(0.7,1.4)$$

其中c_{in}表示内层材料的比热容，ρ_{in}表示内层材料的密度，k_{in}表示内层材料的导热系数。

防寒服最外层与外部环境接触面成立第三类边界条件

$$k_{out}\frac{\partial T}{\partial x}-h_{ce}T\bigg|_{x=0}=-h_{ce}T_{env}$$

其中T_{env}表示外界低温环境的温度。

最外层与中间层交界面成立：

$$k_{out}\frac{\partial T_{out}}{\partial x}\bigg|_{x=0.3}=k_{mid}\frac{\partial T_{mid}}{\partial x}\bigg|_{x=0.3}$$

中间层与最内层交界面成立：

$$k_{mid}\frac{\partial T_{mid}}{\partial x}\bigg|_{x=0.7}=k_{in}\frac{\partial T_{in}}{\partial x}\bigg|_{x=0.7}$$

最内层与人体接触面也成立第三类边界条件：

$$k_{in}\frac{\partial T}{\partial x}+h_{cp}T\bigg|_{x=1.4}=h_{cp}T_{per}$$

其中T_{per}表示人体温度。

每一层的初始条件都与人体体温相同，为：

$$T_0 = 37, x \in (0, 1.4)$$

5.1.2 有限差分法[2]求解

对于以上微分方程组，求出解析解是十分困难且没有必要的，因此我们采用有限差分法将微分方程转换为相应的差分方程，从而递推求出数值解。

有限差分法的用法是，我们将连续的定解区域用有限个离散点构成的网格来代替，把定解区域上的连续变量的函数用网格上定义的离散变量的函数来近似，并把原方程和定解条件中的微商用差商来近似。最终，把原微分方程和定解条件用代数方程组来代替，即得到有限差分方程组。解此方程组就可以得到原问题在离散点上的近似值。

我们采用显式前向差分格式，即求解第$(j+1)$时间层上温度时，依赖于j时间层的温度信息。为了将热传导偏微分方程差分化，我们必须对求解区域的时间和空间进行离散化处理：将低温防护服的解析面沿x坐标方向以$\Delta x = 0.05mm$等间距分割；对于时间t，从$t = 0$开始按间隔$\Delta t = 0.035s$分割。

从而温度对时间的一阶偏导数可以采用一阶向前差分格式表达：

$$\frac{\partial T_{i,j}}{\partial t} = \frac{T_{i,j+1} - T_{i,j}}{\Delta t}$$

温度对空间坐标的二阶导数可以采用二阶中心差分格式表达：

$$\frac{\partial^2 T_{i,j}}{\partial x^2} = \frac{T_{i+1,j} + T_{i-1,j} - 2T_{i,j}}{\Delta x^2}$$

其中$T_{i,j}$表示第j个厚度层在第i个时间层的温度。

通过上述步骤实现微分方程的差分化，可以给出以下差分方程组与定解条件：

$$c_{out}\rho_{out}\frac{T_{i,j+1} - T_{i,j}}{\Delta t} = \frac{T_{i+1,j} + T_{i-1,j} - 2T_{i,j}}{\Delta x^2}, i \in [0,6]$$

$$c_{mid}\rho_{mid}\frac{T_{i,j+1} - T_{i,j}}{\Delta t} = \frac{T_{i+1,j} + T_{i-1,j} - 2T_{i,j}}{\Delta x^2} + F, i \in [6,14]$$

$$c_{in}\rho_{in}\frac{T_{i,j+1} - T_{i,j}}{\Delta t} = \frac{T_{i+1,j} + T_{i-1,j} - 2T_{i,j}}{\Delta x^2}, i \in [14,28]$$

$$k_{out}\frac{T_{1,j} - T_{0,j}}{\Delta x} - -h_{ce}T_{0,j} = -h_{ce}T_{env}$$

$$k_{out}\frac{T_{6,j} - T_{5,j}}{\Delta x} = k_{mid}\frac{T_{7,j} - T_{6,j}}{\Delta x}$$

$$k_{mid}\frac{T_{14,j} - T_{13,j}}{\Delta x} = k_{in}\frac{T_{15,j} - T_{14,j}}{\Delta x}$$

$$k_{in}\frac{T_{28,j} - T_{27,j}}{\Delta x} + h_{cp}T_{28,j} = h_{cp}T_{per}$$

$$T_{i,0} = 37, \forall i$$

在编程求解前，为得到所需温度点处的放热能力，我们对附件 1 中的数据做三次样条插值，使得放热能力-温度成为一条通过一系列形值点的光滑曲线。然后对该有限差分方程组使用 Python 语言进行编程求解。得到温度随时间的变化关系如下图所示：

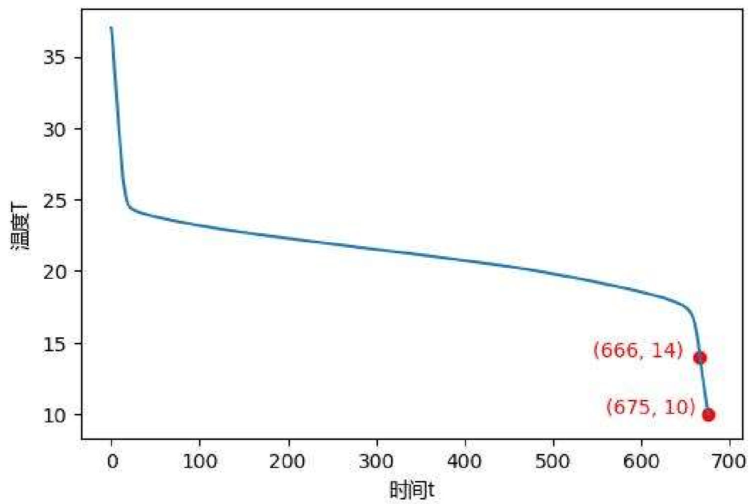

图 2. 体表温度T-时间t变化曲线（无风静止）

以体表温度降低到 10℃作为坚持极限，由上图得知：实验者静止不动，环境无风的情况下能够坚持的时长为$675s$。

5.2 问题二的模型建立与求解

假设长城站外面风速为 $3m/s$，其大小处于受迫对流的风速区间。根据国家标准 GB8175-87，这种情况下的对流换热系数计算可用如下经验关系式计算：

$$h_{c-win} = 11.7 + 7 * \sqrt{v}$$

代入风速$v = 3m/s$可算得$h_{c-win} = 23.82$.

我们参考第一问的热传导偏微分模型，应用有限差分法对微分方程进行处理，我们得到温度随时间的变化关系如下图所示：

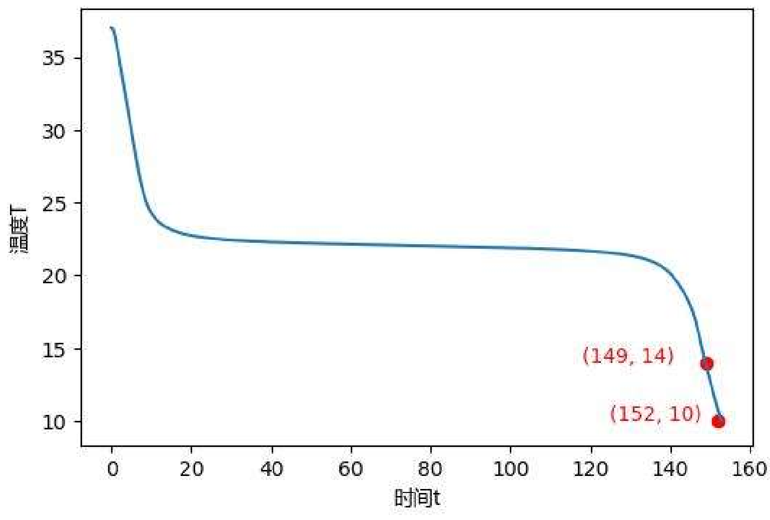

图 3. 体表温度T-时间t变化曲线（有风运动）

由上图得知：实验者轻微运动，在风速$v = 3m/s$的情况下能够坚持的时长为$152s$。

5.3 问题三的模型建立与求解

根据实验者身高$h = 170cm$，体重$w = 60kg$，应用$Stevenson$ 公式可计算出该实验者人体表面积为：

$$S = 0.0061h + 0.0128w - 0.1529 = 1.6521m^2$$

根据附件中低温防护服的相关参数计算得到制作原防护服的各层花费如下：

表 1. 低温防护服各层花费

三层标识	最外层	中间层	内层
费用/元	44.61	16.52	240.55

可以计算出整件防护服的费用为：

$$r_{all} = 44.61 + 16.52 + 240.55 = 301.68 \text{ 元}$$

各层重量与总重量如下：

表 2. 低温防护服各层重量

三层标识	最外层	中间层	内层
重量/千克	0.1417	0.3649	0.2405

可以计算出整件防护服的重量为：

$$w_{all} = 0.1417 + 0.3649 + 0.2405 = 0.7471 \text{ 元}$$

实验者最大承受重量随时间变化的关系式为：

$$W_{max} = 100 - \frac{t}{10} \times 0.5$$

对本系统的多重限定条件如下：

$$r'_{all} \leq 301.68 \times (1 + 50\%) = 452.52\text{元}$$

$$m \leq 100kg$$

$$d_{mid} \leq 0.45mm$$

由于最外层（隔热层）图层每层制作费用为44.6067元，故最多可以增加三层最外层涂层。通过编程分别求解在防护服最外层涂层增加 1、2、3 层时，温度随时间的变化关系如下图所示：

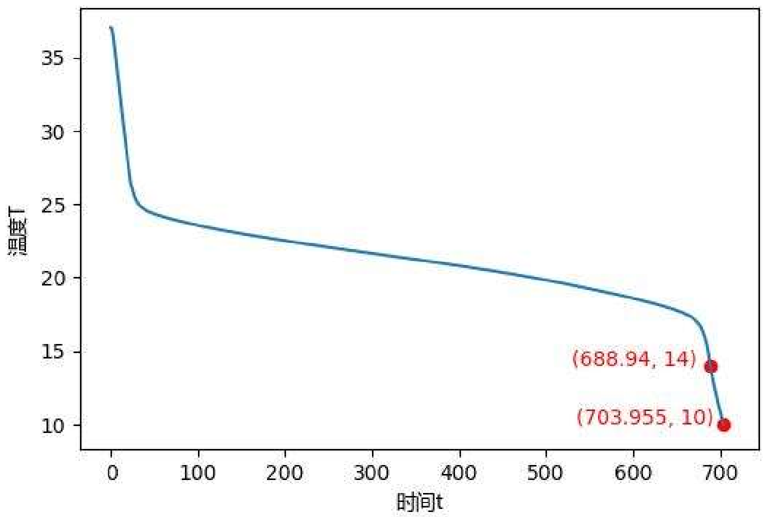

图 4. 体表温度T−时间t变化曲线（增加 1 层隔热层涂层）

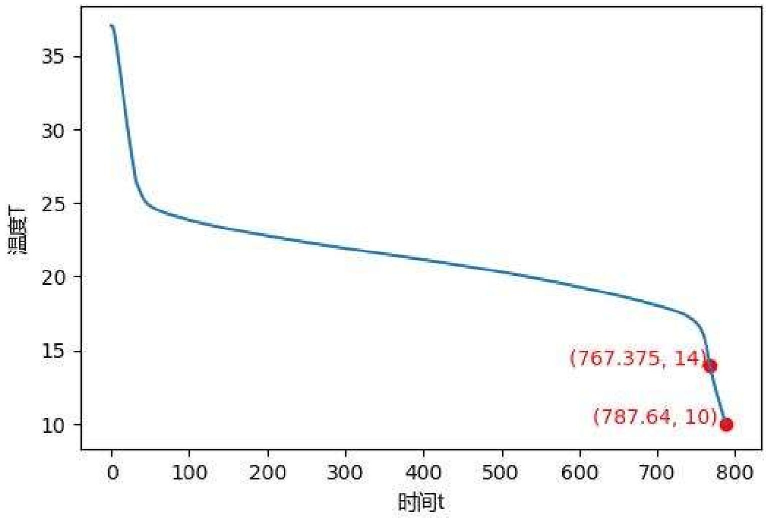

图 5. 体表温度T-时间t变化曲线（增加 2 层隔热层涂层）

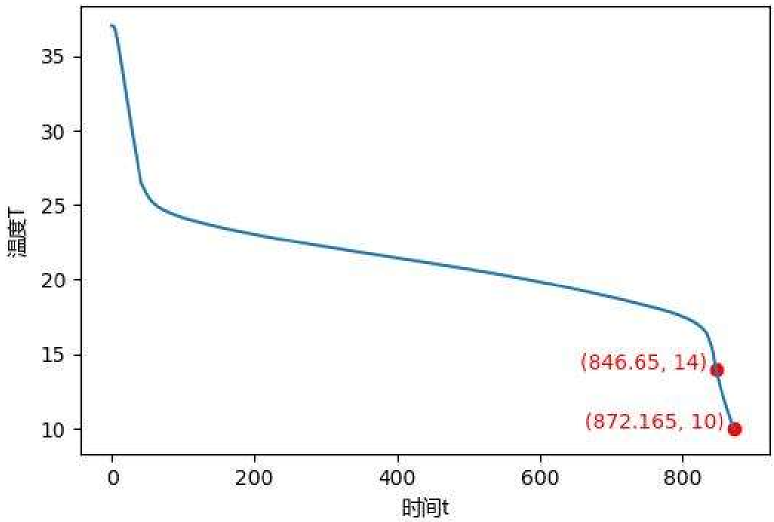

图 6. 体表温度T-时间t变化曲线（增加 3 层隔热层涂层）

由上图得到实验者在室外能够坚持的时长如下表所示：

表 3. 增加外层涂层后实验者坚持时长

增加层数	1	2	3
时长（s）	703.955	787.64	872.165

同时可以验证，每种情况下到体表温度降低到 10℃时，人体的最大承受重量都大于防护服的重量。由此，我们得到防护服的最优增厚方案如下：

表 3. 增加厚度后防护服各层厚度

三层标识	最外层（隔热层）	中间层（功能层）	内层（织物层）
厚度（mm）	1.2	0.45	0.7

实验者在穿着上述参数的防护服的情况下，能够在外站立的时间为$872.165s$。

5.4 问题四的模型建立与求解

在问题三的背景下，如果不追加资金，要想提高实验者在户外的活动时间，我们可以通过提高复合材料中间层的放热能力来实现。对于由新材料制作的防寒服，中间层（功能层）应成立：

$$c_{mid}\rho_{mid}\frac{\partial T_{mid}}{\partial t}=k_{mid}\frac{\partial^2 T_{mid}}{\partial x^2}+\alpha F(x,t),x\in(0.3,0.7)$$

本文应用二分搜索法寻找参数α，使得实验者在外坚持的时长与问题三中的最长时长相同，即用新材料按原参数制成的防护服的御寒能力与问题三中实施最优增厚方案后的防护服的御寒能力相同。

二次搜索算法步骤如下：

1. 取α_1,α_2使$T(\alpha_1)<T_3,T(\alpha_2)>T_3$；
2. 令$b=\frac{\alpha_1+\alpha_2}{2}$，计算$T(b)$；
3. 若$T(b)<T_3$，则令$\alpha_1=b$，否则令$\alpha_2=b$，返回第 2 步；
4. 当$T(b)-T_3<eps$时，b即为所求值；

我们通过编程求解得到：$\alpha=1.379$，即中间功能层的放热能力要比原先提高37.9%，才能使实验者在室外坚持的时间不比第三问中坚持的时间少。

六、模型的评价、改进与推广

6.1 模型的优势

在问题一的模型中，我们建立了一维坐标系用以研究防护服各层的热传导过程，使得模型具有一定的连续性。我们应用有限差分方法进行求解，将连续模型离散化，变量范围网格化，得到的解稳定且收敛。

在问题二的模型中，我们充分考虑了风速对对流换热系数的影响，并由经验公式给出了计算对流换热系数时的修正项，由此得到较为准确的结论。

在问题三的模型中，我们充分利用了多重限定条件穷举了所有可能的情况，最终通过对比得到了最优增厚方案。

在问题四的模型中，我们利用二次搜索算法进行求解，搜索参数α的值的效率较高。

6.2 模型的改进

在本文所给出的基本假设中，已经忽略了热辐射对温度分布的影响，我们可以对此进行补充研究，利用非稳态传热模型建立考虑热辐射项的数学模型，并进行分析以验证假设或给出更为精确的结论。

我们使用的有限差分方法，虽然可以得到较为精确的计算结果，但在编程求解过程中体现出的效率较低，因此在进一步的模型改进中，我们需要优化求解的算法。

本文所采用的模型参数和变量个数较多，导致模型维数较高，为掌握各因素对模型的全局影响，我们可以采用$Sobol$灵敏度分析法[3]对全局灵敏度进行定量分析：

将每个变量的取值范围映射到[0,1]，定义一个k维的单位体Ω^k作为输入因素的空间域，表示为$\Omega^k=\{x:0\le x_i\le 1;i=1,2,\dots,k\}$。

将$f(x)$分解为各子项之和：

$$\mathrm{f}(x_1,x_2,\dots,x_m)=f_0+\sum_{i=1}^{k}f_i(x_i)+\sum\nolimits_{1\le i<j\le k}f_{ij}(x_{ij})+\cdots+f_{12\dots k}(x_1,x_2,\dots,x_k)$$

我们采用基于多重积分的分解方法：

(1) f_0为常数项

(2) 各子项对其所包含的任一因素的积分为0，即$\int_0^1 f_{i_1,i_2,\dots,i_s}(x_{i_1},x_{i_2},\dots,x_{i_s})\,dx_{i_j}=0\ (1\le j\le s)$

(3) 各子项之间正交，即如果$(i_1,i_2,\dots,i_s)\ne(j_1,j_2,\dots,j_s)$，则$\int_{\Omega^k}f_{i_1,i_2,\dots,i_s}\times f_{j_1,j_2,\dots,j_s}\,dx=0$

(4)　各子项可由多重积分求得：

$$f_0=\int_{\Omega^k}f(x)\,dx$$

$$f_i(x_i)=-f_0+\int_0^1\dots\int_0^1 f(x)\,dx_{-i}\quad (i=1,2,\dots,k)$$

$$f_{ij}(x_{ij})=-f_0-f_i(x_i)-f_j(x_j)+\int_0^1\dots\int_0^1 f(x)\,dx_{-(ij)}\ (1\le i<j\le k)$$

……

式中x_{-i}，$x_{-(ij)}$分别代表除x_i及除x_i与x_j之外的其他输入因素，类似地可求其余的高阶子项。

根据统计学原理，模型输出$f(x)$的总方差为$D=\int_{\Omega^k}f(x)^2\,dx-(f_0)^2$，

将各阶子项的方差称为各阶偏方差，s阶偏方差$D_{i_1,i_2,\dots,i_s}=\int_0^1\dots\int_0^1(f_{i_1,i_2,\dots,i_s}(x_{i_1},x_{i_2},\dots,x_{i_s}))^2\,dx_{i_1}dx_{i_2}\dots dx_{i_s}\ (1\le i_1<i_2<\dots<i_s\le k)$

总方差等于各阶偏方差之和：

$$D=\sum_{i=1}^{k}D_i+\sum_{1\le i<j\le k}D_{ij}+\dots+D_{1,2,\dots,k}$$

将各阶灵敏度系数定义为各阶偏方差与总方差的比值，如s阶灵敏度$s_{i_1,i_2,\dots,i_s}$定义为：

$$s_{i_1,i_2,\dots,i_s}=\frac{D_{i_1,i_2,\dots,i_s}}{D}\ (1\le i_1<i_2<\dots<i_s\le k)$$

这里S_i成为因素x_i的一阶灵敏度，表示x_i对输出的影响；$s_{ij}(i\ne j)$为二阶灵敏度系数，表示两因素之间的交叉影响；依此类推，$s_{1,2,\dots,k}$为k阶灵敏度系数，表示k个因素之间的交叉影响。且有如下数量关系：

$$1=\sum_{i=1}^{k}S_i+\sum_{1\le i<j\le k}S_{ij}+\dots+S_{1,2,\dots,k}$$

6.3 模型的推广

本文所给出的基于热传导方程与定解条件的数学模型可应用于研究其他保温材料、防火材料等。

七、参考文献

[1]段志文，《数学物理方程与特殊函数》，华中科技大学数学系：高等教育出版社，2008 年

[2]weixin_30532369，“基于热传递方程和目标规划的高温服装设计”，https://blog.csdn.net/weixin_30532369/article/details/101314530?utm_medium=distribute.pc_aggpage_search_result.none-task-blog-2~all~first_rank_v2~rank_v25-2-101314530.nonecase，2020 年 8 月 7 日

[3] 国家标准 GB8175-87 设备及管道保温设计导则

八、附录

1.calculation.py

```
import numpy as np
import pandas as pd
from scipy.interpolate import interp1d

thickness = [0.3, 0.4, 0.7]
rou = [300, 552.3, 208]
c = [5463.2, 2400, 4803.8]
k = [0.0527, 0.06, 0.068]

v = 20

T_out = [37] * int(thickness[0] * v + 1)
T_mid = [37] * int(thickness[1] * v + 1)
T_in = [37] * int(thickness[2] * v + 1)

T_env = -40
T_peo = 37

target_columns = ['time', 'T']
t_dict = {}

filepath="./attachment1.xlsx"
data = pd.read_excel(io=filepath,sheet_index=0,header=0)
g = data.values[:, 0]
f = data.values[:, 1]
inter = interp1d(g, f, kind="cubic")
g = np.arange(g.min(), g.max(), 0.001)
f = inter(g)
g = [round(i,3) for i in g]

def get_heat(t, g, f):
    if t > max(g) or t < min(g):
        return 0
    index =int((t-14.05)*1000)
    s = f[index]
    f[index] *= 1
    return s

delta_x = 0.05 * 0.001
delta_t = 0.035
T = [0] * 200000
```

```
sign = 0
afa = 1.379

for t in np.arange(0, 200000):
    h1 = 2.38 * (T_out[0] - T_env) ** 0.25
    #h1 = 14
    h2 = 3
    r = k[0] / (c[0]*rou[0]) * delta_t / (delta_x**2)
    #print(r)
    if T_out[0] > -40:
        T_out[0] = 2*r*T_out[1] + (1 - 2*r- 2*r*delta_x*h1/k[0])*T_out[0] + 2*r*delta_x*h1*T_env/k[0]
    if T_out[0] < -40:
        T_out[0] = -40

    for i in range(1, int(thickness[0] * v)):
        T_out[i] = r * (T_out[i+1] + T_out[i-1]) + (1 - 2*r) * T_out[i]
        if T_out[i] < -40:
            T_out[i] = -40



    T_out[-1] = (k[0] * T_out[-2] + k[1] * T_mid[1]) / (k[0] + k[1])
    T_mid[0] = T_out[-1]



    r = k[1] / (c[1]*rou[1]) * delta_t / (delta_x**2)
    for i in range(1, int(thickness[1] * v)):
        s = T_mid[i]
        T_mid[i] = r * (T_mid[i+1] + T_mid[i-1]) + (1 - 2*r) * T_mid[i] - afa * get_heat(round(T_mid[i], 3), g, f) * 1000 * delta_t / c[1]
        if s <= T_mid[i]:
            T_mid[i] = s
        if T_mid[i] < -40:
            T_mid[i] = -40

    T_mid[-1] = (k[1] * T_mid[-2] + k[2] * T_in[1]) / (k[1] + k[2])
    T_in[0] = T_mid[-1]



    r = k[2] / (c[2]*rou[2]) * delta_t / (delta_x**2)

    for i in range(1, int(thickness[2] * v)):
        s = T_in[i]
        T_in[i] = r * (T_in[i+1] + T_in[i-1]) + (1 - 2*r) * T_in[i]
```

```
        if s <= T_in[i]:
            T_in[i] = s
        if T_in[i] < -40:
            T_in[i] = -40

    T_in[-1] = 2*r*T_in[-2] + (1 - 2*r- 2*r*delta_x*h2/k[2])*T_in[-1] + 2*r*delta_x*h2*T_peo/k[2]
    print(T_in[-1])
    T[t] = T_in[-1]
    if T_in[-1] <= 14 and sign == 0:
        sign = 1
        t2 = t
    if T_in[-1] <= 10:
        print("-----------hard-------------")
        print(t2)
        print("-----------threat-------------")
        s = t
        print(s)
        break

t = np.arange(s+1) * delta_t
t_dict[target_columns[0]] = t[:]
t_dict[target_columns[1]] = T[:t.size]
t_generation = pd.DataFrame(t_dict)
t_generation.drop_duplicates(subset=None, keep='first', inplace=True)
t_generation.to_csv("./T5.csv", index=None)
```

2.plot.py

```
import pandas as pd
from matplotlib import pyplot as plt
from matplotlib import font_manager

my_font = font_manager.FontProperties(fname="C:\Windows\Fonts\msyh.ttc")
plt.figure(dpi=100)
data = pd.read_csv('./T5.csv', sep=',')
t = data.values[:,0]
T = data.values[:,1]
plt.plot(t, T)
r1 = 24190
r2 = 24919
plt.scatter([t[r1],t[r2]],[T[r1],T[r2]],c = 'r')
plt.text(t[r1]-190,T[r1],(round(t[r1],3),14),color='r')
plt.text(t[r2]-210,T[r2],(round(t[r2],3),10),color='r')
```

```
plt.xlabel("时间 t", fontproperties=my_font)
plt.ylabel("温度 T", fontproperties=my_font)
```